

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

В.А. Лисовский

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЧ ПЛАЗМЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Методическое пособие для лабораторных работ
по предмету “Физические основы ВЧ плазменно-технологических систем”

Харьков – 2009

УДК 533.9-115(075.8)
ББК 22.333я73
Л63

*Утверждено Ученым Советом физико-технического факультета
Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина
(протокол № 9 от 26 ноября 2008 г.)*

Рецензенты: профессор кафедры экспериментальной физики
физического факультета, доктор физико-
математических наук, профессор Егоренков Владимир
Дмитриевич;
профессор кафедры физики плазмы физико-
технического факультета, доктор физико-
математических наук, профессор Бизюков Александр
Анатолиевич.

Лисовский В.А.

Физические основы ВЧ плазменно-технологических систем:
Методическое пособие для лабораторных работ по предмету
“Физические основы ВЧ плазменно-технологических систем”. – Х.:
ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. - 24 с.

Эти методические указания для лабораторных работ подготовлены для студентов физико-технического факультета, которые изучают курс “Физические основы ВЧ плазменно-технологических систем” на кафедре физических технологий физико-технического факультета. Лабораторные работы охватывают различные свойства высокочастотного газового разряда низкого давления (зажигание разряда в высокочастотном и комбинированном электрических полях, различные режимы горения высокочастотного разряда и т.д.).

© ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009
© Лисовский В.А., 2009
© Макет обложки Дончик И.Н., 2009

Предисловие

Высокочастотный емкостный разряд нашел широкое применение в плазменных технологических процессах травления полупроводниковых, металлических и диэлектрических материалов, осаждения аморфных пленок кремния и его нитридных и оксидных соединений, алмазоподобных защитных покрытий, плазменной очистки изделий сложной конфигурации, плазменной стерилизации медицинских инструментов, для накачки газоразрядных лазеров и т.д. Все электронные устройства содержат микросхемы, изготовленные с помощью высокочастотного разряда. Жидкокристаллические мониторы, плазменные телевизоры, солнечные панели, оптические устройства с просветляющими покрытиями и другие – можно привести длинный перечень современных изделий, при изготовлении которых используется высокочастотный разряд. Поэтому изучение свойств этого типа газового разряда студентами-физиками является актуальным.

Эти методические указания к лабораторным работам подготовлены для студентов физико-технического факультета, которые изучают курс “Физические основы ВЧ плазменно-технологических систем” на кафедре физических технологий. Студентам предлагается выполнить четыре лабораторных работы, которые охватывают различные свойства высокочастотного газового разряда низкого давления (зажигание разряда в высокочастотном и комбинированном электрических полях, различные режимы горения высокочастотного разряда и т.д.).

Каждая лабораторная работа содержит теоретическую часть, которая описывает современное состояние научных достижений в области газового разряда, описание экспериментального оборудования, перечень заданий, которые нужно выполнить, вопросы к студентам, а также перечень дополнительной литературы.

Лабораторная работа № 1.

Пробой газа в высокочастотном электрическом поле

Высокочастотный (ВЧ) емкостный газовый разряд широко используется в технологических процессах плазменного травления и модификации различных материалов, осаждения тонких пленок, плазменной очистки технологических газоразрядных камер, плазмохимии, для накачки газовых лазеров, стерилизации медицинских инструментов и т.д. При этом для оптимизации плазменных технологических процессов часто необходимо знать условия пробоя газа в разрядном устройстве (кривую зажигания разряда).

Зажиганием разряда называется процесс превращения непроводящего газа в проводник, при этом происходит пробой газа. Если приложить постоянное или переменное напряжение к электродам с газовым промежутком между ними, то газ ведет себя как изолятор до тех пор, пока напряжение не превысит определенную величину, называемую пробойным напряжением. После пробоя проводимость газа резко возрастает, в цепи электродов может протекать значительный ток, величина которого определяется сортом и давлением газа, приложенным напряжением, а также сопротивлением внешней цепи.

Назовем ВЧ кривой зажигания зависимость ВЧ пробойного напряжения от давления газа. Различают такие ветви на ВЧ кривых зажигания, как диффузионно-дрейфовая, пашеновская и мультипакторная. Диффузионно-дрейфовая ветвь находится в диапазоне давлений от точки поворота вблизи и справа от минимума ВЧ кривой зажигания. В ВЧ пробое при этом принимают участие не только ионизация молекул газа электронным ударом, дрейф электронов в ВЧ поле и диффузионный уход электронов на электроды и стенки разрядной камеры, но и вторичная электронная эмиссия с

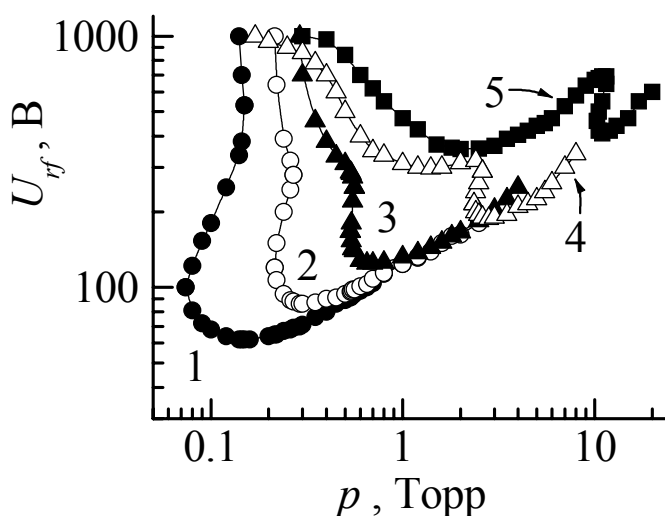


Рис.1.1. ВЧ кривые зажигания в воздухе:
1 - $L = 29$ мм, 2 - $L = 20$ мм; 3 - $L = 14$ мм; 4 - $L = 9$ мм; 5 - $L = 6,5$ мм

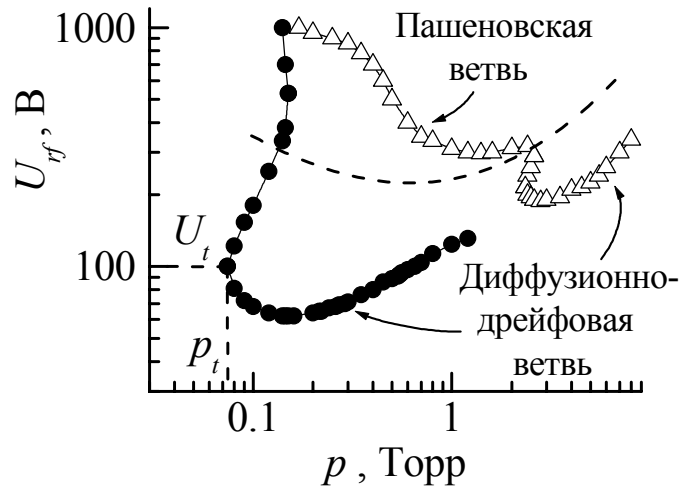


Рис.1.2. ВЧ кривые зажигания с указанием диффузионно-дрейфовой и пашеновской ветвей.

поверхности электродов. Улучшение эмиссионных свойств поверхности электродов приводит к уменьшению пробойного ВЧ напряжения и смещению ВЧ кривой зажигания в область более низких давлений.

На диффузионно-дрейфовой ветви в области низких давлений слева от минимума кривой зажигания ВЧ разряда наблюдается область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения U_{rf} от давления газа p . Диффузионно-дрейфовая ветвь наиболее ярко выражена при достаточно больших расстояниях между электродами ($L > 1$ см). При небольших расстояниях между электродами ($L < 1$ см) диффузионно-дрейфовая ветвь выражена менее ярко, но при этом на кривой зажигания может наблюдаться второй минимум. Этот второй минимум, находящийся при более низких давлениях, чем минимум диффузионно-дрейфовой ветви, иногда называют пашеновским (основным) минимумом. Поэтому соответствующую ветвь ВЧ кривой зажигания называют пашеновской. ВЧ пробой при этих условиях аналогичен пробоем газа в постоянном электрическом поле. При достаточно низком давлении газа пробойное ВЧ напряжение слабо зависит от давления газа (кривая для 6,5 мм на рисунке). Здесь наблюдается переход к резонансному, вторично-эмиссионному режиму зажигания ВЧ разряда, а данную ветвь ВЧ кривой зажигания часто называют мультипакторной.

Более подробно рассмотрим процессы, принимающие участие в ВЧ пробое газа. Возьмем некоторую точку на кривой зажигания при большом давлении газа. Разряд зажигается, когда электроны набирают необходимую для ионизации молекул газа энергию. При этом должен выполняться баланс электронов, т.е. число электронов, родившихся благодаря ионизации, должно быть равно числу электронов, ушедших на электроды и стенки трубки вследствие диффузии и дрейфа в ВЧ электрическом поле. Амплитуда смещения электронов в ВЧ поле $A = eE_{rf} / m\nu_{en}\omega$, (E_{rf} амплитудное значение ВЧ поля, e и m заряд и масса электрона, соответственно, $\omega = 2\pi f$, ν_{en} частота

электрон–нейтральных соударений) в этом диапазоне давлений мала по сравнению с зазором между электродами L . Райзер в своей книге [1] утверждает, что для зажигания разряда каждый электрон до ухода на стенки разрядной камеры или электроды должен совершить в среднем 3 – 10 ионизирующих столкновений с молекулами газа, что, по-видимому, справедливо как для пробоя газа в постоянном электрическом поле, так и для ВЧ пробоя газа.

Теперь немного уменьшим давление газа в разрядной камере. При этом электрон реже сталкивается с молекулами газа, теряет меньше энергии на возбуждение электронных, колебательных и вращательных уровней молекул. Поэтому электрон может набрать необходимую для ионизации молекул энергию в меньшем ВЧ поле, и пробойное ВЧ напряжение с понижением давления газа уменьшается.

При низких давлениях газа вблизи и справа от минимума ВЧ кривой зажигания начинает играть немаловажную роль вторичная электронная эмиссия с поверхности электродов. Часть электронов, ушедших в электроды из-за колебательного движения в ВЧ поле, может вернуться в межэлектродный промежуток в виде вторичных электронов. Это означает, что в ВЧ пробое принимает участие дополнительный источник заряженных частиц.

Дальнейшее понижение давления газа приводит к тому, что заметная часть электронов уходит в электроды при осцилляциях в ВЧ поле, поэтому пробойное ВЧ напряжение достигает минимума (для диффузионно–дрейфовой ветви) и затем начинает увеличиваться. Когда амплитуда смещения электронов $A = L/2$, большое количество электронов уходит в электроды, и кривая зажигания проходит через точку поворота с координатами $p = p_t$ и $U_{rf} = U_t$.

Теперь установим давление газа в разрядной камере $p = p_t$ и приложим к электродам ВЧ напряжение, немного превышающее U_t . При этих условиях ВЧ разряд может не зажечься из-за того, что подавляющее большинство электронов уходит в электроды, не успев перед этим совершить достаточное количество ионизирующих столкновений с молекулами газа. Для зажигания ВЧ разряда нужно либо приложить к электродам высокие ВЧ напряжения, позволяющие электронам набрать высокие энергии (десятки электронвольт) и резко увеличить частоту ионизирующих столкновений электронов с молекулами газа (а также вызвать интенсивную вторичную электронную эмиссию при столкновениях электронов с поверхностью электродов), либо обеспечить на пути уходящих в электроды электронов большее количество молекул газа, т.е. повысить давление газа. Поэтому ВЧ кривая зажигания отклоняется в область более высоких давлений газа, и мы можем наблюдать область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения U_{rf} от давления газа p .

Дальнейшее качественное поведение ВЧ кривой зажигания разрядной плазмы сильно зависит от расстояния между электродами и сорта газа. При небольших межэлектродных зазорах (см. выше, например, ВЧ кривые

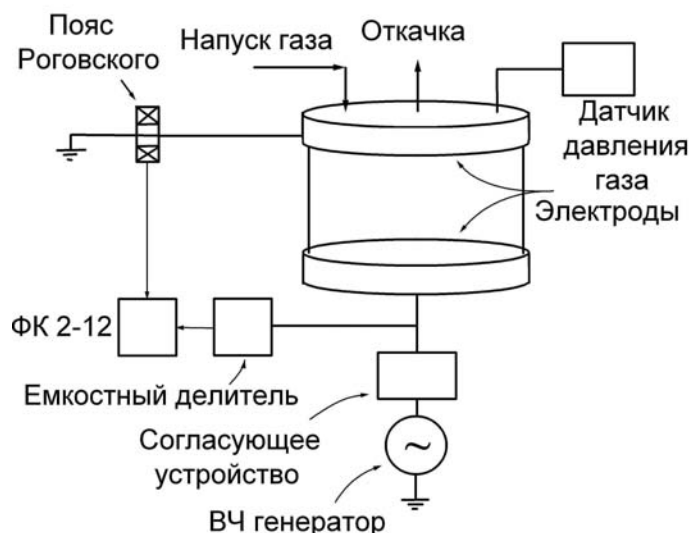


Рис.1.3. Камера с симметричными электродами

зажигания в воздухе при $L = 6,5$ мм и $L = 9$ мм) диффузионно–дрейфовые ветви находятся при достаточно высоких давлениях ($p \approx 2 - 10$ Торр). Область неоднозначности на ВЧ кривой зажигания в воздухе хорошо видна практически во всем диапазоне исследованных нами расстояний между электродами L . Когда амплитуда смещения электронов в ВЧ поле $A \geq L$, то пробой газа в ВЧ поле развивается подобно пробоем газа в постоянном электрическом поле при изменяющейся через каждые полпериода полярности электрического поля. При этом оказывается, что значительная часть электронов за время путешествия от мгновенного “катода” к мгновенному “аноду” успевает набрать значительную энергию и совершает ионизирующие столкновения с молекулами газа. Если расстояние между электродами L и давление газа p таковы, что с понижением давления газа ионизационная способность электрона растет, то на ВЧ кривой зажигания появляется второй минимум (соответствующий пашеновской ветви). На основании того, что ВЧ пробой при этих условиях аналогичен пробоем газа в постоянном электрическом поле, данную ветвь ВЧ кривой зажигания называют пашеновской ветвью. С понижением давления ионизационная способность электрона достигает максимума и затем уменьшается, при этом ВЧ пробойное напряжение проходит через второй (пашеновский) минимум и затем растет.

При достаточно низком давлении газа и узких зазорах между электродами пробойное ВЧ напряжение слабо зависит от давления газа. По-видимому, здесь наблюдается переход к резонансному, вторично–эмиссионному режиму зажигания ВЧ разряда, а данную ветвь ВЧ кривой зажигания называют мультипакторной. При низких давлениях электроны движутся вдоль разрядной трубки, сталкиваясь с электродами чаще, чем с молекулами газа. Электроны могут размножаться, только если они движутся между электродами в резонансе с ВЧ полем и сталкиваются с электродами достаточно энергично, чтобы выбивать вторичные электроны.

Целью данной работы является измерение кривой зажигания ВЧ разряда в симметричной камере (с электродами равной площади, перекрывающими все поперечное сечение разрядной трубки).

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, описаниями приборов, используемых при выполнении лабораторной работы, а также правилами техники безопасности при работе с ними.
2. Включить установку.
3. Открыть клапан вакуумного насоса и откачать камеру.
4. Включить систему напуска газа и напустить азот до давления 0,05 Торр.
5. Включить высокочастотный генератор.
6. Измерить ВЧ кривую зажигания разряда. Для измерения ВЧ напряжения использовать вольтметр, встроенный в согласующее устройство. Нужно, устанавливая последовательно различные фиксированные значения давления газа, медленно повышать ВЧ напряжение и регистрировать его наибольшее значение перед самым пробоем газа. Эта методика применима вблизи и справа от минимума ВЧ кривой зажигания. Слева от минимума диффузионно-дрейфовой ветви ВЧ кривая зажигания может иметь область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения от давления газа. Для измерения этой части ВЧ кривой зажигания нужно сначала установить такое низкое давление газа, при котором ВЧ разряд не зажигается, затем зафиксировать нужную величину ВЧ напряжения, и тогда медленно увеличивать давление газа до момента зажигания разряда.
7. Построить график с измеренной ВЧ кривой зажигания.
8. Выключить ВЧ генератор.
9. Выключить напуск газа.
10. Закрыть клапан вакуумного насоса.
11. Выключить установку.

Вопросы к лабораторной работе:

1. Какие ветви имеет ВЧ кривая зажигания?
2. Какие механизмы рождения и потерь заряженных частиц играют роль при ВЧ пробое при условиях различных ветвей кривой зажигания?
3. Почему на ВЧ кривых зажигания может наблюдаться область неоднозначности?

Литература:

- [1] Левитский С.М. Исследование потенциала зажигания высокочастотного разряда в газе в переходной области частот и давлений // ЖТФ. – 1957. – Т.2, № 5. – С. 970-977.
- [2] Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in combined fields // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol.27, No.11. – P. 2340-2348.
- [3] Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. RF breakdown of low-pressure gas and a novel method for electron drift velocity determination in gases // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1998. – Vol.31, No.23. – P. 3349-3357.

Лабораторная работа № 2.

Режимы горения высокочастотного емкостного разряда

ВЧ разряд может гореть в двух различных режимах: слабotoчном (α –) и сильноточном (γ –режиме). В α –режиме электроны приобретают энергию для ионизации атомов газа в ВЧ поле в плазменном объеме. Проводимость приэлектродных слоев мала, а ток между плазмой и электродами замыкается в основном током смещения. В слабotoчном α –режиме электроны заполняют приэлектродный слой в течение его анодной фазы. В катодной фазе расширяющаяся граница слоев выметает электроны обратно в плазменный объем, при этом они приобретают энергию. Скорость ионизации молекул газа этими электронами значительно больше, чем электронами, набравшими энергию только в ВЧ электрическом поле в плазме.

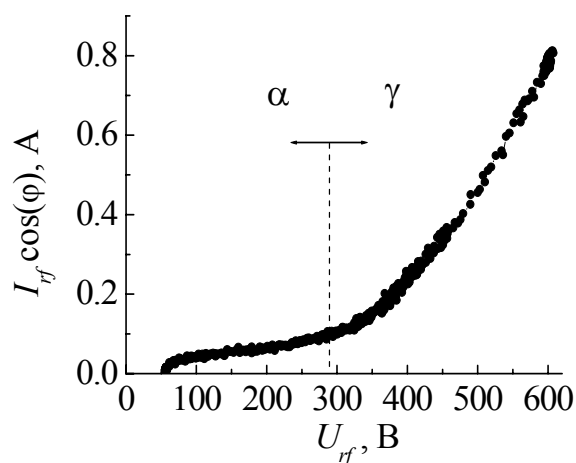


Рис.2.1. Вольт-амперная характеристика ВЧ разряда при $L = 27$ мм и давлении водорода $p = 0,75$ Торр.

В γ –режиме при условиях интенсивной эмиссии электронов с поверхности электродов в приэлектродных слоях развиваются электронные лавины, ионизация атомов газа электронным ударом происходит в основном вблизи границы приэлектродного слоя. При этом эмиссия электронов с поверхностей электродов существенно влияет на процесс размножения электронов и поддержание разряда. Приэлектродные слои в γ –режиме обладают значительной проводимостью и по характеристикам подобны катодному слою тлеющего разряда постоянного тока. ВЧ разряд при средних давлениях газа ($p > 10$ Торр) переходит из α – в γ –режим резким скачком, при этом в несколько раз увеличиваются плотность плазмы в разрядном объеме и амплитуда ВЧ тока. При средних давлениях газа α – γ переход сопровождается полной перестройкой пространственной структуры ВЧ разряда (если в α –режиме плотность плазмы максимальна в центре разряда, то в γ –режиме максимумы плотности плазмы наблюдаются вблизи границы приэлектродного слоя, а в центральной области разряда на осевом распределении плотности плазмы наблюдается минимум). При более низких

давлениях ($p < 10$ Торр) ВЧ разряд переходит из α - в γ -режим плавно, без резких скачков.

Вольт-амперная характеристика является важным источником информации о свойствах горящего разряда. Под вольт-амперной характеристикой здесь мы будем считать зависимость тока проводимости $I_{rf} \cos \phi$ от ВЧ напряжения на электродах U_{rf} , где I_{rf} амплитуда ВЧ тока, ϕ угол сдвига фазы между током и напряжением. По поведению вольт-амперной характеристики судят о процессах, происходящих в разрядном объеме и приэлектродных слоях. Так, при переходе ВЧ емкостного разряда из одного режима горения в другой (α - γ переход) на вольт-амперной характеристике наблюдается излом (скачок производной разрядного тока по напряжению на электродах).

За напряжение α - γ перехода ВЧ разряда принимается такая величина ВЧ напряжения U_{rf} , при которой наблюдается скачок производной dI_{rf}/dU_{rf} . При этом в приэлектродных слоях развиваются электронные лавины, с ростом ВЧ напряжения быстро увеличивается плотность плазмы во всем разрядном промежутке. Визуальные наблюдения показывают, что при низких и промежуточных давлениях газа структура ВЧ разряда становится очень похожей на структуру тлеющего разряда постоянного тока, когда приложенное к электродам ВЧ напряжение еще явно недостаточно для пробоя приэлектродных слоев.

Поэтому в качестве критерия перехода из α - в γ -режим принимается следующее изменение параметров ВЧ разряда. С ростом ВЧ напряжения α - γ переход сопровождается уменьшением ВЧ тока проводимости в цепи электродов $I_{rf} \cos \phi$. Считают, что α - γ переход происходит при таком ВЧ напряжении, при котором ток проводимости и плотность плазмы в центральной области разряда достигают максимума. При α - γ переходе

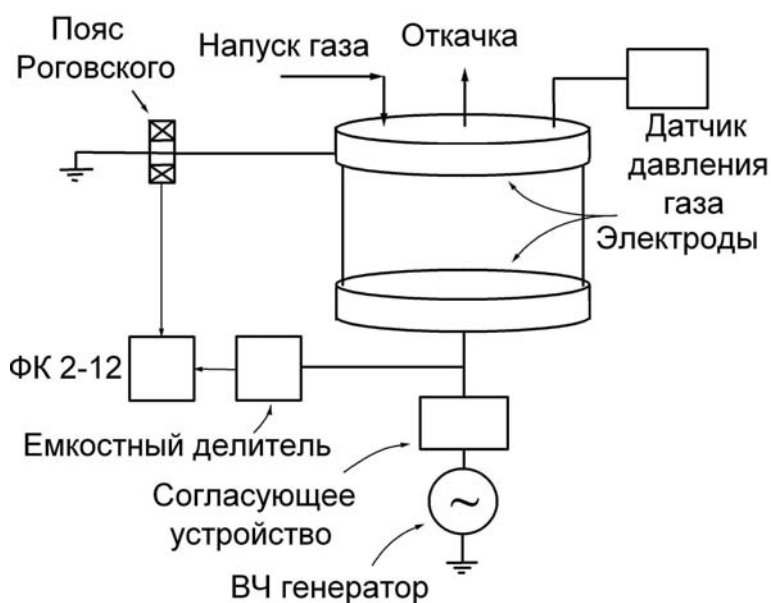


Рис.2.2. Камера с симметричными электродами

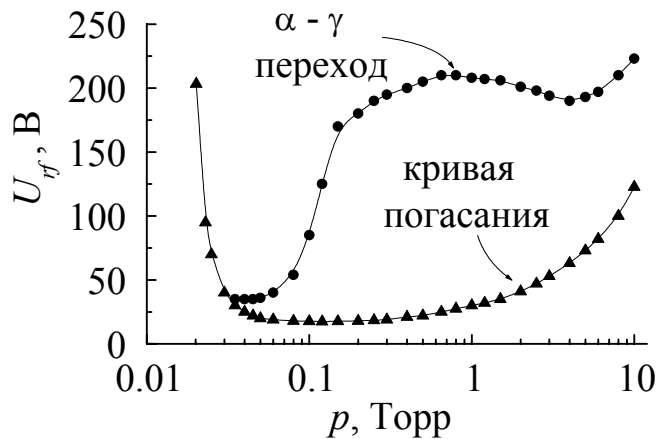


Рис.2.3. Кривая погасания и кривая α - γ перехода ВЧ разряда в аргоне

происходит перестройка структуры ВЧ разряда: однородное свечение положительного столба α -режима скачком превращается в два отрицательных свечения и два темных фарадеевых пространства тлеющего разряда, которые перекрываются в центре разряда. Появление в центре разряда темной области хорошо регистрируется визуально, что совместно с измерениями тока проводимости позволяет надежно регистрировать факт α - γ перехода. При α - γ переходе изменяется также видимое свечение разряда: белое (при промежуточных давлениях – красноватое) свечение приобретает фиолетовый оттенок, что указывает на появление в разряде быстрых электронов.

Область существования α -режима ограничена со стороны высоких давлений. При более высоком давлении газа ВЧ разряд сразу после зажигания будет гореть в γ -режиме, т.к. величина ВЧ напряжения будет достаточно высокой для того, чтобы пробить узкий приэлектродный слой. При понижении давления газа ВЧ напряжение α - γ перехода уменьшается. Затем кривая α - γ перехода достигает кривой погасания ВЧ разряда, поэтому α -режим ограничен со стороны низких давлений.

На рисунке показаны кривая погасания ВЧ разряда и кривая α - γ перехода. Из рисунка видно, что в области средних давлений ($p > 10$ Торр) кривая α - γ перехода стремится к кривой погасания ВЧ разряда. При уменьшении давления ВЧ напряжение $U_{\alpha-\gamma}$ на электродах, при котором наблюдается α - γ переход, сначала понижается и достигает минимума (аналогичного минимуму кривой Пашена для зажигания тлеющего разряда). Затем $U_{\alpha-\gamma}$ немного увеличивается и в диапазоне давлений аргона $p \approx 0,5 - 1$ Торр $U_{\alpha-\gamma}$ достигает максимума. Дальнейшее понижение давления приводит к быстрому уменьшению $U_{\alpha-\gamma}$, и в диапазоне давлений $p \leq 0,03$ Торр кривая α - γ перехода совпадает с кривой погасания ВЧ разряда.

При α - γ переходе пробой слоя происходит только при достаточно высоком давлении газа, и кривая α - γ перехода $U_{\alpha\gamma.br}$ имеет U-образный

профиль. При более низком давлении α - γ переход не сопровождается пробоем приэлектродного слоя.

Часть быстрых электронов, вышедших из поверхности электродов и набравших при прохождении слоя высокую энергию, могут дойти до границы слоя почти без столкновений. При низком давлении газа из слоя в плазму выходит пучок быстрых электронов, способных ионизовать молекулы газа. Чем ниже давление газа, тем реже электроны сталкиваются в слое с молекулами газа, тем выше энергия электронов на выходе из слоя, и тем меньшее нужно приложить к электродам ВЧ напряжение, чтобы большое количество электронов выходило из слоя с высокой энергией. То есть при низком давлении газа приэлектродный слой не пробит, однако слои являются источником быстрых электронов, способных ионизовать молекулы газа.

При низких давлениях ($p < 0,05$ Торр) вторичные электроны, вышедшие с поверхности электродов под действием бомбардировки ионами и метастабильными атомами, проходят приэлектродный слой практически без столкновений, набирая при этом на всей длине слоя энергию вплоть до $\varepsilon_e \approx eU_{sh}$ (U_{sh} ВЧ напряжение на слое). Когда $U_{sh} \geq U_i$, (например, $U_i = 15,8$ В – потенциал ионизации атома аргона), из слоя в плазму проникает пучок быстрых электронов, ионизирующих на своем пути атомы газа. ВЧ разряд переходит в γ -режим, область плазмы по характеристикам становится аналогом двух отрицательных свечений тлеющего разряда, перекрывающихся в центре разряда. Электроны набирают энергию в слое, а ионизуют атомы газа в плазме сравнительно далеко от границы слоя.

При давлениях $p \approx 0,05 - 0,5$ Торр пересекающие слой вторичные электроны успевают один или несколько раз упруго и неупруго столкнуться с атомами газа и из-за этого набирают на длине слоя меньшую энергию, чем в бесстолкновительном случае. Поэтому при повышении давления α - γ переход происходит при более высоких ВЧ напряжениях на слое $U_{sh} > U_i$ и на электродах. Вблизи электрода электроны ускоряются в сильном ВЧ поле и именно здесь приобретают большую часть своей энергии. Поскольку в этом диапазоне давлений ионизационная длина пробега электронов λ_e превышает толщину слоя d_{sh} , то значительная часть ионизирующих столкновений будет происходить не только вблизи границы слоя, но и в плазме.

Целью данной работы является определение области существования α -режима ВЧ емкостного разряда.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, описаниями приборов, используемых при выполнении лабораторной работы, а также правилами техники безопасности при работе с ними.
2. Включить установку.
3. Открыть клапан вакуумного насоса и откачать камеру.
4. Включить систему напуска газа и напустить азот до давления 0,05 Торр.
5. Включить высокочастотный генератор.

6. Измерить кривую погасания ВЧ разряда. Для этого нужно, последовательно устанавливая различные фиксированные значения давления газа, зажигать разряд и затем медленно понижать ВЧ напряжение и регистрировать его наименьшее значение перед самым погасанием газа.
7. Одновременно определять величину ВЧ напряжения α - γ перехода, при котором происходит перестройка структуры ВЧ разряда.
8. Выключить ВЧ генератор.
9. Выключить напуск газа.
10. Закрыть клапан вакуумного насоса.
11. Выключить установку.
12. Построить графики с измеренными кривой погасания и кривой ВЧ напряжения α - γ перехода. Область существования α -режима ВЧ разряда находится между этими двумя кривыми.

Вопросы к лабораторной работе:

1. В каких режимах может гореть ВЧ разряд?
2. Какие механизмы поддержания играют роль при различных режимах ВЧ разряда?
3. В чем состоит причина перехода ВЧ разряда из одного режима в другой?

Литература:

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. – 1987. – 592 с.
- [2] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. - М.: Изд-во МФТИ; Наука-Физматлит. – 1995. – 320 с.
- [3] Яценко Н.А. Связь высокого постоянного потенциала плазмы с режимом горения высокочастотного емкостного разряда среднего давления // ЖТФ. – 1981. – Т.51, №6. – С. 1195-1204.
- [4] Belenguer Ph., Boeuf J.P. Transition between different regimes of rf glow discharges // Phys. Rev. A. – 1990. – Vol.41, No.8. – P. 4447-4459.
- [5] Godyak V.A., Kanneh A.S. Ion bombardment secondary electron maintenance of steady RF discharge // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1986. – Vol.PS-14, No.2. – P. 112-123.
- [6] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н. Структура приэлектродных слоев высокочастотного разряда и переход между двумя его формами // Физика плазмы. – 1987. – Т.13, №4. – С. 471-479.
- [7] Лисовский В.А. Особенности α - γ перехода в ВЧ разряде низкого давления в аргоне // ЖТФ. – 1998. – Т.68, №5. – С. 52 - 60.
- [8] Lisovskiy V., Booth J.-P., Landry K., Douai D., Cassagne V., Yegorenkov V. Modes and the alpha-gamma transition in rf capacitive discharges in N₂O at different rf frequencies // Physics of Plasmas, – 2006. – Vol.13, No.10. – 103505.

Лабораторная работа № 3.

Нормальный режим высокочастотного емкостного разряда

При низких давлениях газа ВЧ разряд во всем диапазоне ВЧ напряжений занимает всю поверхность электродов и горит только в аномальном режиме. При этом увеличение ВЧ напряжения сопровождается ростом ВЧ тока. Однако, начиная с некоторого давления газа, рост ВЧ тока происходит при слабо изменяющемся ВЧ напряжении, при этом увеличивается площадь, занимаемая разрядом на электроде. В этом случае ВЧ разряд горит в нормальном режиме.

В нормальном режиме только часть поверхности электрода покрыта разрядом. При уменьшении разрядного тока падение напряжения на слое и толщина слоя сохраняются постоянными ($U = U_n$, $pd = (pd)_n$, где p давление газа), занимаемая разрядом на катоде площадь S уменьшается, при этом плотность тока $j = I/S$ сохраняется также постоянной ($j = j_n$). В разряде постоянного тока нормальный режим горения может наблюдаться только справа от минимума кривой зажигания тлеющего разряда (т.е. при $pL \geq (pL)_{\min}$, где L – расстояние между электродами), а при меньших давлениях газа тлеющий разряд горит только в аномальном режиме. При этом нормальная плотность тока $j_n \propto p^2$, т.е. отношение j_n / p^2 является постоянной величиной, выводимой из принципа подобия. Когда разряд покрывает всю поверхность электрода, происходит переход из нормального в аномальный режим.

На вольт-амперной характеристике при переходе из нормального в аномальный режим виден излом. Измеряя величину тока при ВЧ

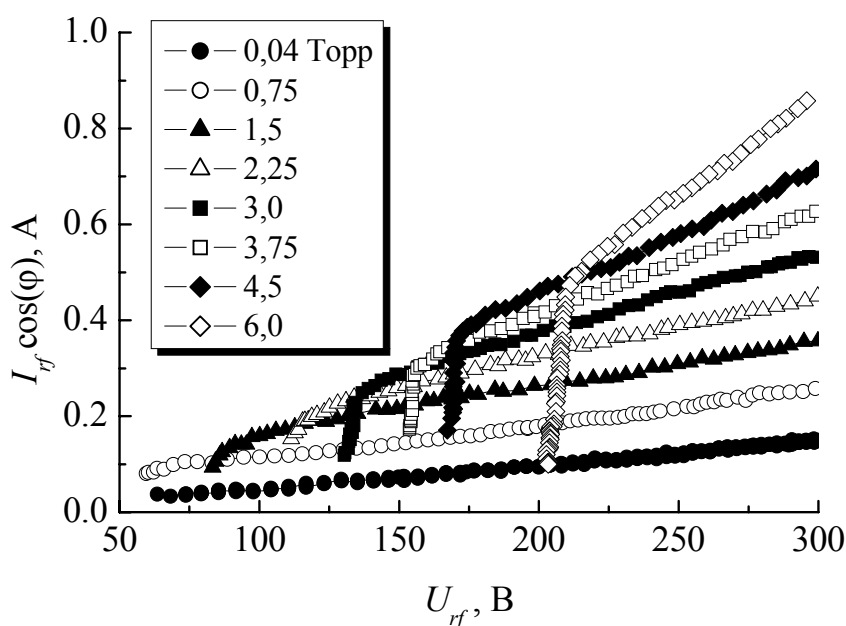


Рис.3.1. Вольт-амперные характеристики ВЧ разряда при различных давлениях газа

напряжении, как только разряд покрыл всю поверхность электрода, можно определить нормальную плотность тока. На рисунке показаны зависимость нормальной плотности тока, от давления газа. Представленные на этом рисунке результаты, построенные в логарифмическом масштабе, хорошо описываются линейной зависимостью.

В разряде постоянного тока нормальный режим связан с существованием минимума на вольт-амперной характеристике катодного слоя. В ВЧ разряде в слабotoчном α -режиме причиной появления нормального режима является наличие минимума на вольт-амперной характеристике всего разряда в целом. Вольт-амперная характеристика плазмы является падающей (для падения ВЧ напряжения на плазме можно принять следующее выражение $U_{pl} = C \cdot p \cdot L \cdot J^m$, где C и m константы). В

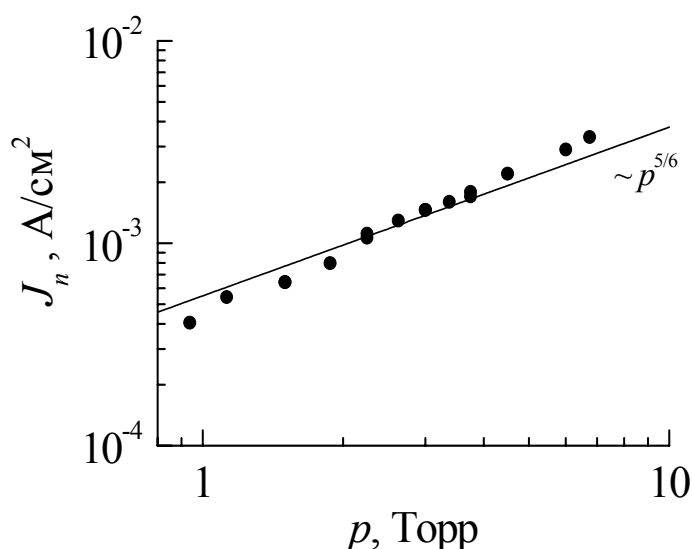


Рис.3.2. Зависимость нормальной плотности тока от давления газа для частоты ВЧ электрического поля 13,56 МГц. Линия – результаты расчета по формуле (2)

приэлектродных слоях вольт-амперная характеристика растущая, через слои течет ток смещения. Падение ВЧ напряжения на слоях U_{sh} выражается формулой $U_{sh} = \frac{4\pi d_{sh}}{\omega} J$, где d_{sh} толщина слоя, $\omega = 2\pi f$ циклическая частота ВЧ электрического поля, J плотность ВЧ тока. Между ВЧ напряжением на слоях U_{sh} и плазме U_{pl} имеется сдвиг фаз $\pi/2$ (т.к. через них текут соответственно ток смещения и активный ВЧ ток), поэтому ВЧ напряжение на электродах U_{rf} равно $U_{rf} = (U_{sh}^2 + U_{pl}^2)^{1/2}$. Тогда можно получить формулу для минимальной (нормальной) плотности тока J_n :

$$J_n = \left(\frac{\omega C p L \sqrt{m}}{4\pi d_{sh}} \right)^{1/(m+1)}. \quad (1)$$

Недостатком этой формулы является наличие неопределенных величин C и m . Поэтому из формулы (1) можно сделать только качественные выводы о росте J_n с частотой ω и давлением газа p (при этом скорости роста остаются неизвестными). При более аккуратном рассмотрении процессов в плазме (с учетом закона Чайльда-Ленгмюра (закона “трех вторых”) для столкновительного ВЧ слоя, амбиполярного потока положительных ионов из плазмы к границе слоя, а также замыкания тока проводимости в плазме током смещения в слое) можно получить следующую зависимость нормальной плотности тока J_n от циклической частоты ω ВЧ электрического поля и давления p :

$$J_n \propto \omega^{11/6} \cdot p^{5/6}. \quad (2)$$

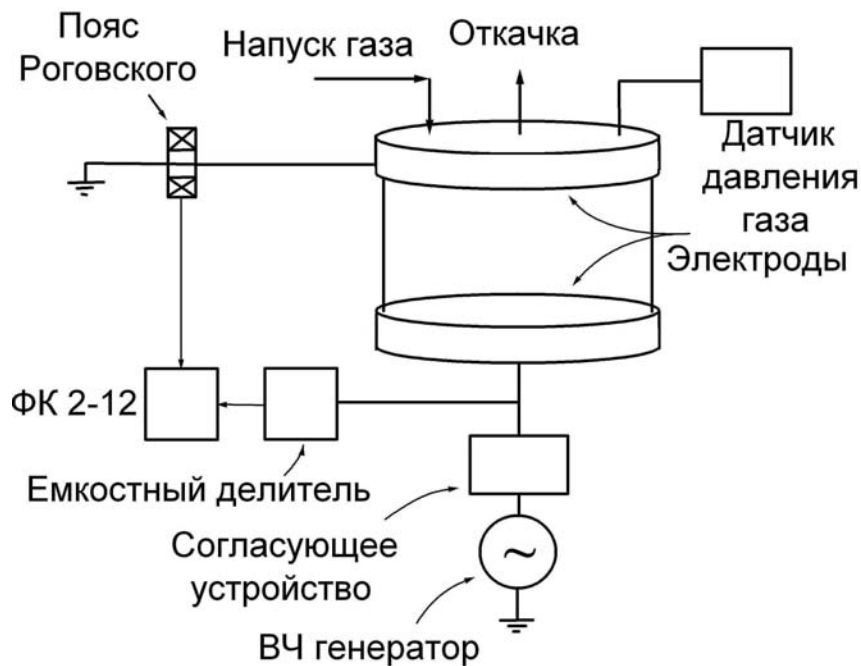


Рис.3.3. Камера с симметричными электродами

Из формулы (2) следует, что нормальная плотность тока практически линейно увеличивается с ростом давления газа. В разряде постоянного тока величина J_n/p^2 считается постоянной, не зависящей от давления газа. В случае ВЧ разряда мы видим монотонное уменьшение J_n/p^2 с ростом давления газа.

Целью данной работы является экспериментальное определение зависимости нормальной плотности тока α -режима ВЧ емкостного разряда от давления газа.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, описаниями приборов, используемых при выполнении лабораторной работы, а также правилами техники безопасности при работе с ними.

2. Включить установку.
3. Открыть клапан вакуумного насоса и откачать камеру.
4. Включить систему напуска газа и напустить азот до давления 0,05 Торр.
5. Включить высокочастотный генератор.
6. Измерить нормальную плотность тока ВЧ разряда при давлении 1 Торр. Для этого нужно определить величину тока I в момент, когда горящий в нормальном режиме разряд только-только покрыл полностью поверхность электродов.
7. Измерения повторить для 10-20 величин давления газа в диапазоне 1 – 10 Торр.
8. Выключить ВЧ генератор.
9. Выключить напуск газа.
10. Закрыть клапан вакуумного насоса.
11. Выключить установку.
12. Определить нормальную плотность тока $J = I/S$, зная площадь электрода S .
13. Построить график зависимости нормальной плотности тока от давления газа.

Вопросы к лабораторной работе:

1. Почему ВЧ разряд может гореть в нормальном режиме?
2. Как ведут себя ВЧ напряжение, плотность тока и толщина слоя в нормальном режиме с ростом тока разряда?
3. Как изменяется нормальная плотность тока ВЧ разряда с ростом давления газа и частоты?

Литература:

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. – 1987. – 592 с.
- [2] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: Изд-во МФТИ; Наука-Физматлит. – 1995. – 320 с.
- [3] Лисовский В.А. Нормальный режим ВЧ разряда в аммиаке // ВІСНИК Харківського національного університету, серія фізична "ЯДРА, ЧАСТИНКИ, ПОЛЯ". – 2008. – т. 823, вип. 3/39. – С. 97-102.

Лабораторная работа № 4.

Пробой газа в комбинированном (ВЧ + постоянном) электрическом поле

Газовый разряд в комбинированном (ВЧ + постоянном электрическом) поле применяется как для определения коэффициентов переноса электронов в газах низкого давления, так и в ряде технологических устройств для спектрохимического анализа, плазменного окисления кремния, плазмотронах, газоразрядных лазерах. Комбинация постоянного и переменного электрических полей повышает устойчивость горения газового разряда, что позволяет вкладывать в разряд большую мощность.

В обычном емкостном ВЧ разряде, горящем при фиксированной частоте f в разрядной камере с зазором L между электродами, давлении газа p и определенной величине ВЧ мощности, поток ионов на электроды и их энергия сохраняются фиксированными. Если изменить, например, давление газа или величину ВЧ мощности, то одновременно изменятся и поток ионов на электроды, и их энергия. Поэтому разделять управление этими двумя величинами в обычном одночастотном ВЧ разряде невозможно. Однако в ряде технологических процессов, использующих ВЧ разряд, необходимо независимо контролировать величину ионной плотности и энергию ионов, бомбардирующих электроды (обрабатываемые материалы, пленки). В ВЧ разряде с комбинированным (ВЧ + постоянным) электрическим полем проблема раздельного управления потоком ионов на электроды и их энергией легко решается, т.к. высокая частота обеспечивает плотную плазму, в то время как постоянное напряжение повышает падение напряжения на “катодном” слое и, как следствие, ускоряет ионы до более высоких энергий.

При нулевом постоянном напряжении U_{dc} получается обычная ВЧ кривая зажигания с областью неоднозначности при низких давлениях газа.

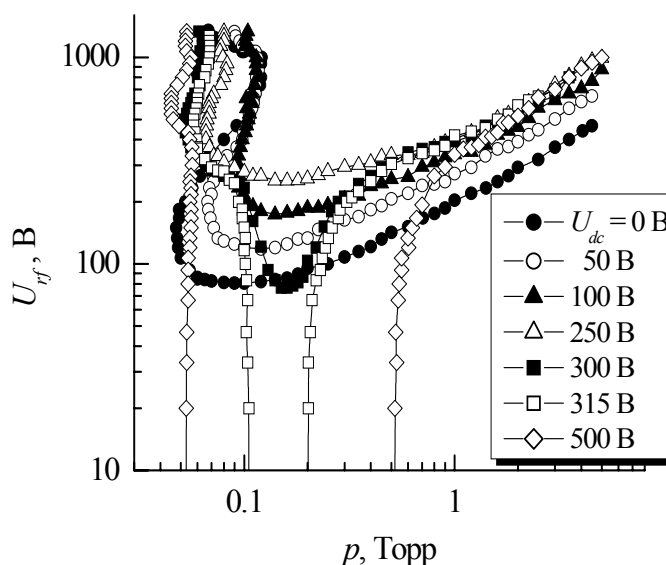


Рис.4.1. Зависимость ВЧ пробойного напряжения от давления газа при различных значениях постоянного напряжения

Наложение U_{dc} сначала приводит к росту ВЧ напряжения зажигания из-за повышенного ухода электронов на электроды. Однако при достаточно высоких U_{dc} постоянное напряжение дает вклад в ионизацию молекул газа. При U_{dc} , близких к минимальному напряжению зажигания разряда постоянного тока, на ВЧ кривой зажигания $U_{rf}(p)$ появляется резко выраженный минимум. При более высоких постоянных напряжениях в диапазоне давлений газа, где зажигается самостоятельный разряд постоянного тока, нет нужды прикладывать дополнительное ВЧ напряжение для зажигания комбинированного разряда, здесь $U_{rf}=0$. Вне этого диапазона наложение постоянного напряжения U_{dc} значительно облегчает зажигание комбинированного разряда.

Теоретические кривые зажигания сравниваются с экспериментальными кривыми зажигания продольного комбинированного разряда на рисунке 4.3. Из рисунка видно, что теоретические кривые удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами в области вблизи и справа от минимумов кривых зажигания; при этом теоретические кривые проходят в

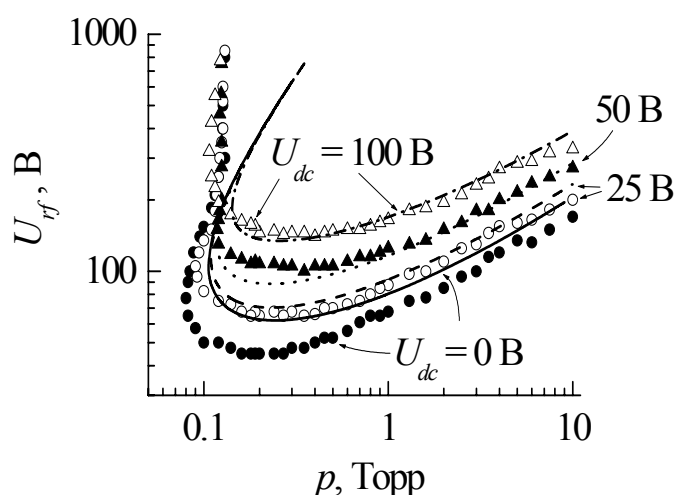


Рис.4.3. Кривые зажигания продольного комбинированного разряда (ВЧ + слабое постоянное электрическое поля) при следующих значениях постоянного напряжения: $U_{DC}=0, 25 \text{ В}, 50 \text{ В}$ и 100 В . Точки представляют экспериментальные данные, кривые рассчитаны с помощью критерия (4)

области более высоких давлений газа, чем экспериментальные точки. По-видимому, это разногласие между теорией и экспериментом вызвано тем, что при теоретических расчетах не учитывалась эмиссия вторичных электронов с поверхности электродов.

Из рисунка также следует, что теоретическая кривая для диффузионно-дрейфовой ветви при низких давлениях имеет два решения (кроме точки поворота), что позволяет описать неоднозначную зависимость пробойного ВЧ напряжения от давления газа.

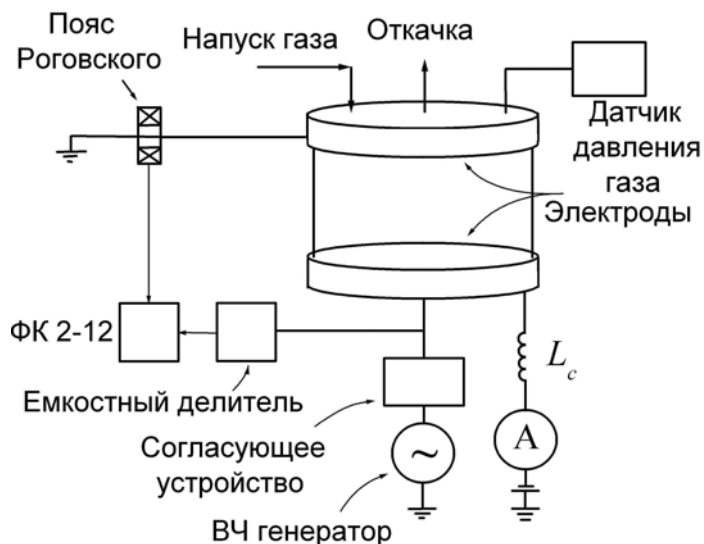


Рис.4.4. Камера с симметричными электродами и комбинированным разрядом

Целью данной работы является исследование влияния постоянного напряжения на напряжение зажигания ВЧ разряда.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, описаниями приборов, используемых при выполнении лабораторной работы, а также правилами техники безопасности при работе с ними.
2. Включить установку.
3. Открыть клапан вакуумного насоса и откачать камеру.
4. Включить систему напуска газа и напустить азот до давления 0,05 Торр.
5. Включить высокочастотный генератор.
6. Включить генератор постоянного напряжения.
7. Установить давление газа 0,2 Торр.
8. Измерить ВЧ напряжение зажигания разряда при нулевом постоянном напряжении. Для этого нужно медленно повышать ВЧ напряжение и регистрировать его наибольшее значение перед самым пробоем газа.
9. Измерить постоянное напряжение зажигания разряда при нулевом ВЧ напряжении. Для этого нужно медленно повышать постоянное напряжение и регистрировать его наибольшее значение перед самым пробоем газа. Полученная при этом величина напряжения зажигания разряда постоянного тока позволит определить верхний диапазон постоянных напряжений, в котором нужно провести дальнейшие измерения.
10. Затем последовательно выполнить измерения пробойного ВЧ напряжения при фиксированных значениях постоянного напряжения

20 В, 40 В и так далее, с шагом в 20 В вплоть до полученного перед этим пробойного постоянного напряжения.

11. Построить график с измеренной зависимостью ВЧ напряжения зажигания разряда от постоянного напряжения.
12. Выключить ВЧ генератор.
13. Выключить генератор постоянного напряжения.
14. Выключить напуск газа.
15. Закрыть клапан вакуумного насоса.
16. Выключить установку.

Вопросы к лабораторной работе:

1. Зачем нужна комбинация ВЧ и постоянного электрических полей?
2. Как влияет постоянное напряжение на пробойное ВЧ напряжение?
3. Почему на ВЧ кривой зажигания при больших постоянных напряжениях наблюдается резкий минимум?

Литература:

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. – 1987. – 592 с.
- [2] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: Изд-во МФТИ; Наука-Физматлит. – 1995. – 320 с.
- [3] Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in combined fields // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol.27, No.11. – P. 2340-2348.
- [4] Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. RF breakdown of low-pressure gas and a novel method for electron drift velocity determination in gases // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1998. – Vol.31, No.23. – P. 3349-3357.

Оглавление

Содержание

Предисловие.....	3
Вступ.....	4
Лабораторная работа № 1. Пробой газа в высокочастотном электрическом поле.....	5
Лабораторная работа № 2. Режимы горения высокочастотного емкостного разряда.....	10
Лабораторная работа № 3. Нормальный режим высокочастотного емкостного разряда.....	16
Лабораторная работа № 4. Пробой газа в комбинированном (ВЧ + постоянном) электрическом поле.....	20

Навчальне видання

Лісовський Валерій Олександрович

Фізичні основи ВЧ плазмово-технологічних систем

Російською мовою